

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی روند تغییرات تبخیر از سطح آزاد آب در شرایط تغییر اقلیم آینده با استفاده از مدل

MLR-Epan (مطالعه موردی: مخزن سد شهید عباسپور)

حسین بهزادی کریمی<sup>۱</sup>، غلامعلی مظفری<sup>۲\*</sup>، کمال امیدوار<sup>۳</sup>، احمد مزیدی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۴

چکیده

تغییر اقلیم می‌تواند مقدار تبخیر از سطوح آبی را دستخوش تغییراتی کند؛ به همین دلیل، برآورد تبخیر از مخازن سدها، اهمیت بسیاری در مدیریت منابع آب دارد. در این پژوهش، چشم‌انداز آبی تبخیر از سطح آزاد آب در مخزن سد شهید عباسپور با استفاده از مدل رگرسیونی تشت تبخیر (MLR-Epan) و با به‌کارگیری روش ریزگردانی LARS-WG6 و خروجی مدل HadGEM2-ES، تحت سناریوهای انتشار RCPs برای سه دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۰ بررسی گردید. براساس نتایج آزمون من-کندال از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۸۰ و تحت سناریو RCP2.6، روند تغییرات سالانه دمای حداقل، دمای حداکثر و تبخیر-تعرق حوضه آبریز کارون افزایشی غیر معنی‌دار است؛ اما تحت الگوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5، روند سالانه پارامترهای مذکور در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ افزایشی می‌باشد. براساس آماره شیب سین، میزان افزایش دمای حداقل و حداکثر در سناریوی بدبینانه (RCP8.5) و برای دوره ۶۰ ساله آینده، به ترتیب ۳ و ۳/۲ درجه سانتی‌گراد و برای متغیر تبخیر-تعرق، ۱۵۷/۷ میلی‌متر پیش‌بینی می‌شود. صحت دقت مدل رگرسیونی تشت تبخیر در دوره پایه توسط نتایج آزمون فرضیات، مورد تأیید قرار گرفت؛ به طوری که ۸۷٪ تغییرات تبخیر از تشت توسط سه متغیر دمای حداقل، دمای حداکثر و تبخیر-تعرق تبیین می‌شود. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که در دوره‌های آبی و براساس هر سه الگوی واداشت تابشی، متوسط سالانه تبخیر سطحی از مخزن سد شهید عباسپور از ۷/۲ تا ۲۰/۲ درصد در مقایسه با دوره مشاهداتی افزایش خواهد یافت. در دوره ۲۰۲۱-۲۰۸۰ و تحت سناریو RCP2.6، روند سالانه تبخیر از سطح آزاد آب، افزایشی است؛ اما این روند افزایشی، معنی‌دار نمی‌باشد؛ در حالی که تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5، روند افزایشی در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ مورد تأیید قرار گرفته است. براساس تخمین گر شیب سین، حجم افزایش تبخیر از سطح مخزن در افق شصت‌ساله آینده و تحت سناریوهای مورد بررسی به ترتیب ۱/۴، ۱۹/۱ و ۳۱/۹ میلی‌متر پیش‌بینی می‌شود؛ لذا با توجه به شرایط اقلیمی آینده، ضروریست با برنامه‌ریزی صحیح و اتخاذ تصمیمات درست از تلفات تبخیر در مخازن سدها کم گردد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، تبخیر از سطح آزاد آب، سناریوهای انتشار RCPs، مدل MLR-Epan، مخزن سد شهید عباسپور

مقدمه

آب شرب، کشاورزی و صنعت، بخصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک است؛ اما حجم زیادی از منابع آب موجود در مخازن سدها از طرق مختلف از دسترس خارج می‌شود (Sima et al., 2013). از جمله روش‌های هدر رفت آب در دریاچه‌های آب شیرین و مخازن سدها، تبخیر از سطح آن‌ها بوده که می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در مدیریت منابع آبی ایفا کند (Gao et al., 2008). برای اندازه‌گیری و برآورد تبخیر سطحی روش‌های مختلفی ارائه شده است که می‌توان آن را به چهار روش تشتک تبخیر، بیلان آب، بیلان انرژی و انتقال جرم تقسیم نمود (Giannou and Antonopoulos., 2007). یکی از روش‌های رایج برای محاسبه تبخیر از سطح دریاچه‌ها و مخازن آبی، استفاده از تشت‌های تبخیر است (ابراهیمی و یزدانی، ۱۳۹۲). تشت تبخیر به‌عنوان وسیله‌ای کم‌هزینه به‌طور مستقیم تبخیر را

تبخیر یکی از فرایندهای مهم و تأثیرگذار در چرخه آب است که در دو شکل تبخیر از سطوح آزاد آب نظیر دریاچه‌ها و تبخیر از سطح خاک لخت اتفاق می‌افتد. آب ذخیره‌شده در دریاچه‌های پشت سدهای احداث‌شده بر روی رودخانه‌ها یکی از منابع آبی مهم تأمین‌کننده نیاز

۱- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- استاد گروه جغرافیای طبیعی (آب و هواشناسی) دانشگاه یزد، یزد، ایران

۳- استاد گروه جغرافیای طبیعی (آب و هواشناسی)، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۴- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی (آب و هواشناسی)، دانشگاه یزد، یزد، ایران

\*- نویسنده مسئول: (Email: mozafari@yazd.ac.ir)

DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.6.2.9

کمیته و دمای بیشینه در این منطقه بین ۰/۵۴ تا ۰/۲۳ درجه سلسیوس در هر دهه افزایش می‌یابد (Dimri et al., 2018). باب الحکمی و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر تبخیر-تعرق مرجع در استان مازندران پرداختند. نتایج نشان داد که درصد تغییرات تبخیر-تعرق در ماه‌های مختلف بین ۱۶/۱- تا ۲۵/۷ درصد متغیر است و بیشترین و کمترین درصد تغییرات تبخیر-تعرق مرجع، به ترتیب در ماه‌های اکتبر و مارس می‌باشد. بابائیان و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی به پیش‌بینی متغیرهای بارش و دما در منطقه شرق کشور پرداختند. نتایج این تحقیق در مورد دما برای دوره آینده نزدیک حاکی از افزایش سالانه ۴/۲ درجه سلسیوس در سناریوی RCP4.5 و ۵/۵ درجه سلسیوس تحت سناریوی RCP8.5 می‌باشد. در دوره آینده دور، نتایج نشان دادند که دمای سالانه ۵/۲ درجه سلسیوس در سناریوی RCP4.5 و ۸/۹ درجه سلسیوس در سناریوی RCP8.5 افزایش می‌یابد. جهانبخش اصل و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی به بررسی تغییرات پارامترهای اقلیمی حوضه آبریز سیمه با استفاده از مدل‌های اقلیمی سری CMIP5 پرداختند. نتایج عدم قطعیت مدل‌ها و سناریوها نشان داد که از بین مدل‌های موجود، مدل HadGEM2-ES تحت سناریوی ۸/۵ بهترین نتیجه را برای دمای حداقل و حداکثر پیش‌بینی کردند. طبق پیش‌بینی صورت گرفته در دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۱)، مقدار دمای حداقل و حداکثر به ترتیب ۱/۵ و ۲/۲ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت.

در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر تبخیر از سطح آزاد آب‌ها مطالعات اندکی صورت گرفته است. دانکرز و کریستنسن در پژوهشی به بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر در حوضه تانا در شمال فنلاند و نروژ پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن مدل توزیعی بیلان آب و با استفاده از مدل‌های اقلیم منطقه‌ای و سناریوهای تغییر اقلیم مربوط به اواخر قرن حاضر، میزان تبخیر را برآورد کردند. نتایج نشان داد که در دوره موردنظر تبخیر از سطوح منابع آب در حوضه آبریز مورد مطالعه در دوره‌های آتی افزایش خواهد یافت (Dankers and Christensen., 2005). مینویل و همکاران، عدم قطعیت مربوط به اثرات تغییر اقلیم روی هیدرولوژی حوضه نوردیک کانادا را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از ۱۰ سناریو اقلیمی با وزن دهی مساوی به واسطه ترکیب پنج مدل چرخه عمومی جو و دو سناریو انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهت تعیین عدم قطعیت متغیرهای هیدرولوژیکی استفاده شد. نتایج تحقیق افزایش ۱ تا ۱۴ درجه‌ای دمای فصلی و تغییر ۹- تا ۵۵ درصدی بارش فصلی را پیش‌بینی کرد. این مطالعه نشان داد که بزرگ‌ترین منبع عدم قطعیت مربوط به مدل‌های GCM است (Minville et al., 2008). جانسون و شارما با استفاده از پنج مدل گردش عمومی و مدل پنمن، میزان تبخیر از سطوح آزاد آب را در دوره‌های ۲۰۳۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ ارزیابی کردند. طبق نتایج، متوسط درصد تغییرات تبخیر از سطح آزاد آب در گستره کشور استرالیا بین ۱/۷ تا ۴/۸ درصد

اندازه‌گیری نموده و نتایج حاصل از آن قابل‌تعمیم به تبخیر از سطوح دریاچه، مخازن و تبخیر-تعرق در کشاورزی است (Irmak et al., 2002). به دلایل مختلف، مقدار تبخیری که از تشت تبخیر به دست می‌آید، بیشتر از مقدار تبخیر از سطح آزاد آب در هر منطقه بوده، ضریب تشتک تعریف می‌شود تا مقدار اندازه‌گیری شده در تشت تبخیر را به مقدار واقعی تبدیل نماید (صفوی، ۱۳۹۳).

از آنجایی که مقدار تبخیر در کشورهای خشک و نیمه‌خشک بسیار زیاد می‌باشد؛ برآورد و پیش‌بینی نرخ تبخیر از مخازن سدها می‌تواند در مدیریت این منابع آبی بزرگ راهگشا باشد (Crage et al., 2005). سالانه حدود ۱۳ درصد از حجم آب ورودی به سد کرخه معادل ۱۰۶/۵ میلیون مترمکعب به‌صورت تبخیر از مخزن این سد تلف شده که با توجه به برق‌آبی بودن این سد حفظ این مقدار از اهمیت بالایی برخوردار است. حجم تبخیر سالانه از چهار سد مهم شهید عباسپور، دز، کارون سه و چهار تقریباً معادل ۲۷۳/۴ میلیون مترمکعب بوده که این میزان بیشتر از حجم آب ذخیره‌شده در سد مسجدسلیمان و بسیاری از سدهای موجود در کشور می‌باشد (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۲). از طرفی در دهه‌های اخیر تولید گازهای گلخانه‌ای در اثر فعالیت‌های انسانی به‌طور فزاینده‌ای افزایش یافته است که با تأثیرگذاری بر روی دمای جو کره زمین، سبب به هم خوردن ترازمندی انرژی در سطح جهانی و گرمایش جهانی و وقوع تغییر اقلیم شده است. با آشکار شدن شواهد تغییر اقلیم در دهه‌های آتی، نگرانی‌ها پیرامون نحوه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از منابع آبی در مواجهه با شرایط اقلیمی جدید افزایش یافته است. این مسئله موجب شده تا بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های آب و هواشناسی در سال‌های اخیر به بررسی اثرات و پیامدهای تغییر اقلیم بر منابع آبی معطوف گردد. افزایش دما در دوره‌های زمانی آینده می‌تواند نرخ تبخیر از سطح آزاد آب مخزن را افزایش دهد و با پایین آوردن حجم فعال مخزن یا سطح آب منجر به شکست مخزن در تأمین بخشی از نیازها گردد؛ بنابراین، حفظ این حجم آب از دست‌رفته می‌تواند تأثیر بسزایی در رشد اقتصادی منطقه گذاشته و از هدر رفت سرمایه‌های انسانی-اقتصادی جلوگیری به عمل آورد. از این‌رو اطلاع دقیق از میزان تبخیر سطحی آب و پیش‌بینی آن در آینده به این مهم کمک بسزایی خواهد کرد.

در زمینه اثرات تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی به‌ویژه دما و تبخیر-تعرق مطالعات زیادی در داخل و خارج از کشور انجام شده است. کلینگ و همکاران به بررسی تغییرات پارامترهای اقلیمی در حوضه آبریز دانوب، تحت تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم پرداختند. طبق نتایج حاصله، همه مدل‌ها، افزایش ۲ تا ۵ درجه سلسیوس دما را تا پایان قرن ۲۱ نشان دادند (Kling., 2012). دیمری و همکاران به ارزیابی تغییرات احتمالی دمای کمیته و دمای بیشینه، تحت سناریوهای مختلف در هیمالیا پرداختند. براساس نتایج حاصله، دمای

انتظار می‌رود با تغییر در پارامترهای اقلیمی به‌ویژه دمای هوا، میزان آن نیز تغییر کند؛ لذا در این پژوهش به بررسی تغییرات تبخیر سطحی از مخزن سد شهید عباسپور واقع در حوضه آبریز کارون با استفاده از مدل رگرسیونی تشت تبخیر (MLR-Epan) در شرایط تغییر اقلیم آینده پرداخته شد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش تحت عنوان حوضه آبریز کارون محدود به مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۷ دقیقه و ۵۵ ثانیه تا ۵۲ درجه و ۰۴ دقیقه و ۵۰ ثانیه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۱۵ دقیقه و ۲۲ ثانیه تا ۳۲ درجه و ۴۹ دقیقه و ۳۵ ثانیه عرض شمالی می‌باشد. با توجه به مساحت حوضه، ۸ ایستگاه همدید به دلیل پراکنش مناسب آن‌ها نسبت به هم و وجود داده‌های تاریخی هواشناسی معتبر و کافی، انتخاب شدند. متغیرهای اقلیمی مورد بررسی شامل آمار روزانه پارامترهای حداقل و حداکثر دما در طول دوره آماری پایه (۲۰۱۵-۱۹۹۶) است. ایستگاه هیدرومتری سد شهید عباسپور نیز با ارتفاع ۸۲۰ متر از سطح دریا در سال ۱۳۵۵ تأسیس شده است. این ایستگاه، حوضه‌ای به مساحت ۱۹۷۴۲ کیلومتر مربع را آب‌سنجی می‌کند. شکل (۱) و جدول (۱)، موقعیت و مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های همیدیدی و هیدرومتری مورد مطالعه در حوضه آبریز کارون را نشان می‌دهد.

هدف اصلی از انجام این تحقیق، بررسی روند تغییرات تبخیر از سطح آزاد آب در مخزن سد شهید عباسپور با استفاده از مدل رگرسیون خطی چندگانه (MLR) می‌باشد. روش کار بدین صورت است که ابتدا مقادیر مشاهداتی ایستگاه‌های همدید واقع در حوضه آبریز کارون شامل دمای حداقل و حداکثر روزانه در دوره آماری ۲۰۱۵-۱۹۹۶ از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. پس از کنترل کیفی داده‌ها (رفع نواقص آماری، تصادفی بودن و همگنی داده‌ها)، داده‌های اقلیمی مورد بررسی با استفاده از مدل ریزمقیاس گردانی LARS-WG<sup>1</sup> برای دوره پایه شبیه‌سازی و پس از صحت‌سنجی مدل با کمک معیارهای نکویی برآزش (RMSE, MSE, MAE) و  $R^2$ ، داده‌های مذکور برای سه دوره زمانی آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۰) با استفاده از خروجی مدل HadGEM2-ES<sup>2</sup> که یکی از مدل‌های جفت شده CMIP5<sup>3</sup> است، تحت سناریوهای انتشار خوش‌بینانه (RCP2.6)، حد وسط (RCP4.5) و بدبینانه (RCP8.5) تولید شدند.

در سطوح انتشار کم تا زیاد برآورده شده است (Johnson and Sharma., 2010). هلفر و همکاران در تحقیقی اثر تغییر اقلیم بر دما و تبخیر از سطح مخزن ویونپول در استرالیا را برای دو دوره ۲۰۵۰-۲۰۳۰ و ۲۰۹۰-۲۰۷۰ بررسی کردند. نتایج نشان داد که دمای سطحی در دوره آتی اول و دوم نسبت به دوره مشاهداتی (۲۰۱۰-۱۹۹۰) به ترتیب از ۲۰/۴ به ۲۱/۵ و ۲۳/۲ درجه سانتی‌گراد خواهد رسید. همچنین مقدار تبخیر از سطح آزاد مخزن حداکثر ۱۵ درصد افزایش می‌یابد (Helfer et al., 2012). گرجی زاده و همکاران (۱۳۹۳) به پیش‌بینی میزان تبخیر از مخزن سد دز در دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۰) پرداختند و در این راستا، هشت مدل تجربی برآورد تبخیر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار تبخیر سالانه از سطح مخزن سد دز تحت هر سه سناریوی مورد بررسی در دوره آتی افزایش می‌یابد؛ به طوری که حجم آب تبخیر شده تحت سه سناریوی A1B، A2 و B1 به ترتیب برابر با ۱/۴۳، ۱/۴۷ و ۰/۹۲ میلیون مترمکعب خواهد بود که از دسترس خارج می‌شود. عابدی کویایی و مظاهری (۱۳۹۵)، اثرات تغییر اقلیم بر دما و تبخیر از مخازن آزاد در اصفهان را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق، متغیرهای دما و تابش خورشیدی برای دوره زمانی ۲۰۴۹-۲۰۲۰ با مدل ریزگردانی LARS-WG برای سه الگوی اقلیمی (ایدئال، میانه و بحرانی) شبیه‌سازی شدند و سپس تبخیر از سطح آزاد آب با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده توسط فرمول استفان استوارت محاسبه گردید. نتایج نشان داد که افزایش مقادیر دما و تابش خورشیدی در دوره آتی می‌تواند تأثیر معنی‌داری در میزان تغییرات تبخیر از سطح آزاد آب داشته باشد؛ به طوری که تغییرات تبخیر برآوردی سالانه بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۶ میلی‌متر در روز خواهد بود. سیدکابلی (۱۳۹۵)، مقدار تبخیر از مخزن سد دز در شرایط تغییر اقلیم آینده را مورد بررسی قرار داد. براساس یافته‌های تحقیق، حجم تبخیر سالانه از مخزن سد در دو دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ و ۲۰۸۰-۲۰۵۱ به‌طور متوسط ۷ و ۱۰ درصد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. ابراهیمی و همکاران (۱۴۰۰) به ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر تغییرات تبخیر از سطح چاه نیمه‌های سیستان پرداختند. در این تحقیق از مدل SDSM برای شبیه‌سازی تبخیر دهه‌های آتی و تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان تبخیر در دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۰ افزایشی بیش از ۳۰۰ میلی‌متر در سال را تجربه خواهد کرد.

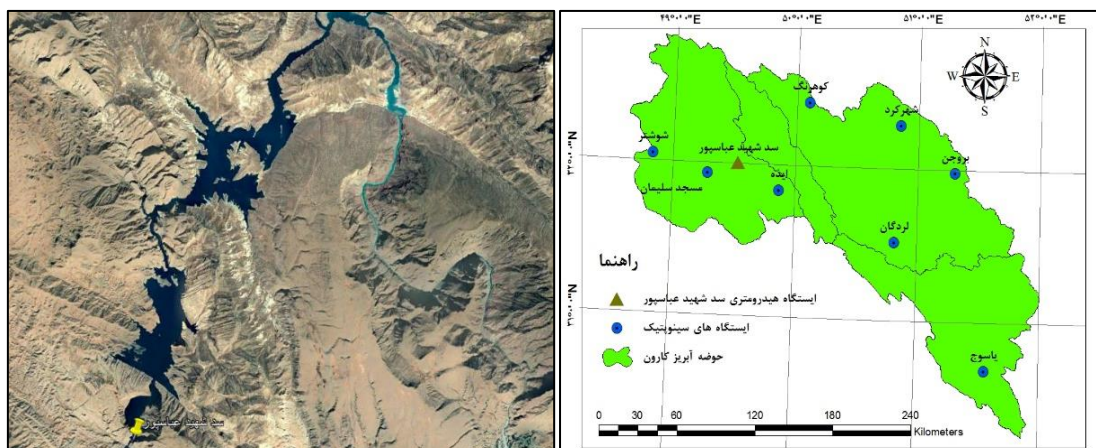
در کشورهایی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، تلفات تبخیر از سطح آزاد آب، سهم قابل توجهی در بیابان آب دریاچه‌ها و مخازن داشته و می‌تواند باعث افت ارتفاع سطح آب شود؛ بنابراین، مدل‌سازی تبخیر از سطح مخازن به‌منظور پیش‌بینی مقدار هدر رفت آب از طریق تبخیر و نیز برنامه‌ریزی صحیح و کاربردی در جهت کاهش میزان این تبخیر و برآورد اقتصادی آن حائز اهمیت می‌باشد (Ma et al., 2011). از آنجاکه میزان تبخیر از سطح آزاد آب در مخازن بزرگ به‌طور مستقیم با متغیرهای اقلیمی در ارتباط است و

1 Multiple Linear Regression

2 Long Ashton Research Station-Weather Generator

3 Hadley centre global environment model- version 2

4 Coupled Model Intercomparison Project Phase 5



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های همدیدی و هیدرومتری مورد مطالعه واقع در حوضه آبریز کارون

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های همدیدی و هیدرومتری مورد مطالعه واقع در حوضه آبریز کارون

ارتفاع از سطح دریا (متر)	عرض جغرافیایی		طول جغرافیایی		نام ایستگاه همدیدی
	درجه	دقیقه	درجه	دقیقه	
۲۰۴۸	۳۲	۱۷	۵۰	۵۱	شهرکرد
۲۲۶۰	۳۱	۵۹	۵۱	۱۸	بروجن
۲۲۸۵	۳۲	۲۵	۵۰	۰۶	کوهرننگ
۱۵۸۰	۳۱	۳۱	۵۰	۴۹	لردگان
۱۸۳۱	۳۰	۴۱	۵۱	۳۴	ياسوج
۶۷	۳۲	۰۳	۴۸	۵۰	شوشتر
۳۲۰	۳۱	۵۶	۴۹	۱۷	مسجد سلیمان
۸۲۷	۳۱	۵۰	۴۹	۵۲	ایزه
ارتفاع از سطح دریا (متر)	مساحت دریاچه	حجم مخزن (میلیون مترمکعب)	مختصات جغرافیایی		نام ایستگاه هیدرومتری
۸۲۰	۵۴/۸ (کیلومتر مربع)	۳۱۳۹	عرض ۳۲ ۰۰ ۱۷	طول ۴۹ ۳۱ ۵۵	سد شهید عباسپور

اعمال ضرایب تشتت کلاس A در هر ماه، میزان تبخیر از سطح آزاد آب در مخزن سد شهید عباسپور تحت سناریوهای مورد بررسی در دوره‌های آبی برآورد گردید.

#### مدل‌های گردش عمومی جو (GCM)

در خصوص مدل‌سازی اقلیمی دوره‌های آینده، روش‌های مختلفی وجود دارد که جامع‌ترین این روش‌ها، مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) هستند. مدل‌های GCM، می‌توانند برای شبیه‌سازی جو-اقیانوسی با مقیاس‌های گوناگون به کار گرفته شوند. یکی از چالش‌های مهم در مطالعات مربوط به مدل‌های گردش عمومی جو،

در ادامه با استفاده از پارامترهای اقلیمی پیش‌بینی‌شده، میزان تبخیر-تعرق در دوره‌های آبی با کمک معادله هارگریوز-سامانی<sup>۱</sup> (H-S) محاسبه گردید. در گام بعد، دقت مدل رگرسیون سه متغیره تبخیر از تشت مخزن سد شهید عباسپور در دوره مشاهده‌ای، براساس نتایج آزمون فرضیات مدل، موردسنجش قرار گرفت. سپس بر مبنای معادله رگرسیون ارائه‌شده، میزان تبخیر از تشت در دوره‌های زمانی آینده و تحت سناریوهای مختلف انتشار پیش‌بینی گردید. (در مدل رگرسیون خطی چندگانه، داده‌های تبخیر از تشت به‌عنوان متغیر وابسته و مقادیر دمای حداقل، دمای حداکثر و تبخیر-تعرق به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند). در پایان با استفاده از روش تشت تبخیر و با

2 Global Circulation Model

1 Hargreaves-Samani

متغیرهای اقلیمی مشاهداتی و عملکرد مناسب آن در منطقه مورد مطالعه که دارای تنوع اقلیمی است، جهت ریزمقیاس گردانی داده‌های خروجی مدل جهانی HadGEM2 تحت سه سناریوی واداشت تابشی (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5) استفاده گردید.

### مدل HadGEM2-ES

مدل HadGEM2 در مرکز هادلی سازمان هواشناسی انگلیس طراحی و توسعه یافته است که دارای قدرت تفکیک مکانی ۱/۲۵ درجه عرض جغرافیایی در ۱/۸۷۵ درجه طول جغرافیایی است و داده‌های آن، برای دوره پایه ۲۰۰۵-۱۸۵۰ و ۲۱۰۰-۲۰۰۶ برای دوره آینده، موجود است. تفکیک مکانی مدل با حدود ۲۰۸ کیلومتر در ۱۳۹ کیلومتر در استوا است که در عرض‌های بالاتر این مقدار کاهش یافته و در عرض جغرافیایی ۵۵ درجه به ۱۲۰ کیلومتر در ۱۳۹ کیلومتر می‌رسد. مؤلفه اقیانوسی از شبکه عرضی و طولی با تفکیک طولی یک درجه و تفکیک مکانی عرضی که از ۱ درجه بین قطبین و ۳۰ درجه شمالی و جنوبی که به طور یکنواخت یک سوم درجه در استوا است؛ استفاده می‌کند (Collins and et al., 2008). ساختار این مدل، پایدار بوده که حالت و وضعیتی واقعی را از شرایط زیستی آب‌وهوا، پوشش گیاهی و اقیانوس بدون نیاز به اصلاحات فرضی و ساختگی ارائه دهد. این مدل، تعامل چرخه کربن را بین اقیانوس، زمین و پوشش گیاهی پویا نشان می‌دهد (Johns and et al., 2006). اجزای مختلف خانواده HadGEM2 در پنجمین گزارش IPCC مورد استفاده قرار گرفتند. بسیاری از پژوهش‌های داخلی و خارجی به خصوص تحقیقاتی که در سطح کشور انجام شده و مدل‌های مختلف گردش عمومی جو مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، بیانگر آن است که مدل HadGEM2، نتایج مناسب و قابل اطمینانی ارائه داده است.

### معیارهای ارزیابی کارایی مدل

در این پژوهش، جهت بررسی عملکرد مدل LARS-WG6 از شاخص‌های ضریب تعیین<sup>۱</sup> ( $R^2$ )، میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> (MSE)، مجذور میانگین مربعات خطا<sup>۳</sup> (RMSE) و میانگین مطلق خطا<sup>۴</sup> (MAE) استفاده شد؛ که روابط مربوط به آن‌ها در ادامه آورده شده است.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i^o \times Q_i^m}{\sqrt{\sum_{i=1}^n Q_i^{o2} \times Q_i^{m2}}} \quad (1)$$

بزرگ مقیاس بودن مکانی متغیرهای شبیه‌سازی شده است؛ بنابراین خروجی‌های حاصل از این مدل‌ها در مقیاس ایستگاهی و حتی حوضه آبخیز قابل استفاده نیستند؛ لذا باید خروجی‌های این مدل‌ها، ریزمقیاس شوند. ریزمقیاس‌نمایی داده‌های حاصل از مدل‌های گردش عمومی جو معمولاً به دو روش آماری و دینامیکی صورت می‌گیرد. در این تحقیق، برای ریزمقیاس گردانی مدل‌های گردش عمومی، از مولد آب و هوایی LARS-WG ابداع شده توسط راسکو و همکاران و سمونوف و بارو استفاده شده است (Racsco et al., 1991; Semenov and Barrow, 1997).

### مدل ریزمقیاس گردانی LARS-WG6

مدل LARS-WG یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی آب و هوایی است که برای تولید مقادیر بارش، تابش، دماهای حداکثر و حداقل روزانه در یک ایستگاه، تحت شرایط اقلیم حاضر و آینده به کار می‌رود. مبنای مدل LARS-WG برای مدل‌سازی، طول دوره‌های خشک و تر، بارش روزانه و سری‌های تابش توزیع نیمه تجربی هست. در این مدل، سری‌های فوریه، دما را تخمین می‌زنند. دماهای کمینه و بیشینه روزانه به صورت فرآیندهای تصادفی با میانگین و انحراف معیارهای روزانه که وابسته به وضعیت تر یا خشک بودن روز مورد نظر هستند؛ مدل‌سازی می‌شوند. سری فوریه، مرتبه سوم برای شبیه‌سازی میانگین دمای فصلی به کار می‌رود. مقادیر باقی‌مانده‌ها که از تفریق مقادیر میانگین از مقدار مشاهداتی به دست می‌آیند، در تحلیل خودهمبستگی زمانی داده‌های کمینه و بیشینه مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش کار به این صورت است که مدل، داده‌های دیده‌بانی شده دوره مشاهداتی را دریافت نموده، با بررسی آن‌ها، مشخصه‌های آماری داده‌ها استخراج می‌شوند؛ سپس به منظور صحت سنجی و اطمینان از توانمندی مدل، برای دوره آماری پایه، مدل را اجرا نموده تا یک سری داده‌های مصنوعی مجدداً ایجاد شود؛ سپس این خروجی‌ها، به منظور ارزیابی عملکرد مدل در بازسازی داده‌ها، با مشخصات آماری مشاهداتی مقایسه می‌شوند. تطابق مشخصات آماری داده‌های مشاهداتی و داده‌های بازتولیدی، نشان می‌دهد که می‌توان از مدل LARS-WG6 به منظور ریزمقیاس گاهی (در مقیاس ایستگاهی) خروجی مدل‌های اقلیمی GCM و برآورد تغییرات فراسنج‌های دما و بارش برای دوره آتی استفاده کرد. (آقاشاهی و همکاران، ۱۳۹۱). این مدل با سایر مولدهای تصادفی پرکاربرد که از زنجیره مارکف استفاده می‌کنند؛ مقایسه شده و در تعدادی از مناطق با تنوع اقلیمی ارزیابی شده است. نتایج، گویای آن است که این مدل اگر از سایر مدل‌ها بهتر نباشد، حداقل به خوبی آن‌ها بوده است (Semenov and Stratonovich., 2010). لذا در پژوهش حاضر با توجه به توانایی خوب مدل LARS-WG6 در بازسازی

1 Coefficient of Determination

2 Mean Squared Error

3 Root Mean Square Error

4 Mean Absolute Error

رابطه، برآورد و پیش‌بینی است؛ به‌گونه‌ای که با آن بتوان کمیت متغیری نامعلوم را با استفاده از متغیرهای معلوم تعیین کرد (عساکره، ۱۳۹۰). رگرسیون چندگانه در حقیقت، ارتباط بین یک سری از متغیرهای پیشگو را با متغیر پاسخ موردنظر بیان می‌کند (Balan et al., 1995). در صورت وجود متغیرهای مستقل  $x_1, x_2, \dots, x_n$  اگر بخواهیم ارتباط خطی بین آن‌ها و متغیر  $Y$  که وابسته به آن‌هاست ایجاد کنیم، رابطه زیر باید بین آن‌ها برقرار باشد:

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + x_n + e \quad (5)$$

که در این رابطه  $a_1, a_2, \dots, a_n$  از مقادیر با عنوان ضرایب رگرسیون یاد می‌شود. این ضرایب، ضرایب نامشخصی هستند که در حقیقت، مسئول برآورد پارامتر پاسخ هستند.

در چند دهه اخیر یکی از روش‌های مهم برای شناخت ارتباط درونی متغیرها و تعیین رابطه همبستگی بین تبخیر و مجموعه‌ای از عناصر اقلیمی، رگرسیون چندگانه هست. در این تحقیق، تبخیر از سطح آزاد آب به‌عنوان متغیر وابسته و پارامترهای اقلیمی مختلف (دمای حداقل، دمای حداکثر و تبخیر-تعرق) به‌عنوان متغیرهای مستقل به مدل معرفی می‌شوند. بهترین مدل انتخابی، مدلی است که بتواند تخمین بهتری را از دو یا چند متغیر وابسته دیگر ارائه دهد.

#### برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از روش هارگریوز-سامانی (H-S)

معادله هارگریوز-سامانی یکی از روش‌های شناخته‌شده و معتبر جهت محاسبه مقادیر تبخیر-تعرق است. در این روش، لازم است برای دوره موردنیاز، دمای متوسط هوا ( $T$ ) و تفاوت متوسط حداکثر و حداقل دما ( $TR$ ) را در دوره موردنظر داشته باشیم. سپس با داشتن تابش خورشیدی ( $R_a$ )، مقدار تبخیر-تعرق به‌صورت معادله زیر قابل محاسبه است (Hargreaves-Samani, 1985).

$$ETO = 0.0023R_a(T + 17.8)(TR)^{0.5} \quad (6)$$

که در آن:  $TR$  تفاوت حداکثر و حداقل دما برحسب درجه سلسیوس است.

$ETO$  همان واحدی را خواهد داشت که برای  $R_a$  انتخاب خواهیم کرد؛ که می‌توان آن را برحسب میلی‌متر در روز از جدول ویژه به دست آورد (علیزاده، ۱۳۸۷). مقادیر  $R_a$  برای منطقه مورد مطالعه در جدول (۲) آورده شده است.

#### برآورد تبخیر از سطح آزاد آب با استفاده از روش تشت تبخیر

در این مطالعه، برای اندازه‌گیری میزان تبخیر از سطح آزاد آب در مخزن سد شهید عباسپور از روش تشت تبخیر استفاده گردید که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_w = k(E_{pan}) \quad (7)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^o - Q_i^m)^2}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^o - Q_i^m)^2}{n}} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i^o - Q_i^m|}{n} \quad (4)$$

در این روابط،  $Q_i^o$  داده‌های مشاهداتی،  $Q_i^m$  داده‌های شبیه‌سازی شده و  $n$  تعداد داده‌هاست.

#### تحلیل روند با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال و تخمین گر شیب سین

آزمون ناپارامتری من-کندال (M-K)، برای بررسی تصادفی بودن داده‌ها (عدم وجود روند) در مقابل وجود روند در سری‌های زمانی هیدرولوژیکی و هواشناسی مورداستفاده قرار می‌گیرد (Zhang et al., 2000). در این آزمون،  $H_0$  نشان‌دهنده عدم وجود روند و  $H_1$  وجود روند را در سری زمانی داده‌ها نشان می‌دهد (Gocic and Trajkovic, 2013). آماره استاندارد  $Z$  در آزمون من-کندال از توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس یک پیروی می‌کند و برای اندازه‌گیری روند استفاده می‌شود. در آزمون M-K، مقدار مثبت  $Z$ ، نشان‌دهنده روند صعودی است؛ درحالی‌که مقدار منفی آن نشان‌دهنده روند نزولی در سری زمانی است. باید توجه داشت که در این آزمون عدم پذیرش  $H_0$  به این معنا نیست که روند در سری زمانی وجود ندارد؛ در حقیقت نشان می‌دهد که شواهد موجود برای نتیجه‌گیری عدم وجود روند در سری زمانی کافی نیست. همچنین جهت برآورد شیب واقعی روند در سری زمانی، از روش ناپارامتریک سین (Sen) استفاده شد (Sen, 1968). تخمین گر شیب سین با استفاده از تحلیل تفاوت بین مشاهده‌ای یک سری زمانی، یک شیب میانه را برای سری زمانی داده‌ها محاسبه می‌کند. در روش سین، برای هر دو جفت داده متوالی، یک شیب محاسبه می‌شود. شیب‌های محاسبه‌شده، تشکیل یک سری زمانی می‌دهند که میانه آن‌ها، شیب‌خط روند را نشان می‌دهد. در این پژوهش، برای انجام آزمون‌های روند یابی از نرم‌افزار MAKESENS2.0 تحت نرم‌افزار Excel که توسط سالمی و همکاران به‌منظور کشف و برآورد روند در سری‌های زمانی بارندگی و آلودگی اتمسفر در مؤسسه هواشناسی فنلاند توسعه‌یافته است؛ استفاده گردید (Salmi et al., 2002).

#### مدل رگرسیون خطی چندگانه (MLR)

روش رگرسیون یک فن آماری-ریاضی و تحلیلی برای بیان

جدول ۲- مقادیر تابش خورشیدی (Ra) برحسب میلی‌متر در روز برای منطقه مورد مطالعه

Ra	Month	Ra	Month
۱۷/۸	july	۷/۶	january
۱۶/۱	august	۹/۶	february
۱۳/۵	september	۱۲/۷	march
۱۰/۷	october	۱۵/۳	april
۸/۲	november	۱۷/۴	may
۷	december	۱۸/۲	june

انحراف معیار آن‌ها می‌باشد با داده‌های مشاهداتی مقایسه گردید. شکل ۲، نشان می‌دهد که میانگین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و همچنین انحراف معیار دمای حداقل و حداکثر به هم نزدیک بوده و اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند که حاکی از عملکرد مناسب مدل LARS-WG6 جهت شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای مذکور در منطقه مورد مطالعه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل، در ایستگاه‌های شوشتر، مسجدسلیمان و ایذه واقع در غرب حوضه از عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر ایستگاه‌ها، برخوردار است.

همچنین جهت اطمینان از صحت سنجی مدل، از شاخص‌های خطاسنجی MAE، MSE، RMSE و  $R^2$  نیز استفاده شد جدول (۴). نتایج حاصل نشان داد که مقدار ضریب تبیین در پارامترهای حداقل و حداکثر دما در همه ایستگاه‌ها، بین ۰/۹۸ تا ۰/۹۹ متغیر می‌باشد؛ بنابراین، مدل LARS-WG6، در شبیه‌سازی داده‌های مذکور در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه، از دقت زیادی برخوردار است.

### بررسی روند تغییرات سالانه پارامترهای اقلیمی حوضه آبریز کارون در دوره‌های آبی و تحت سناریوهای انتشار RCPs

به منظور آشکارسازی روند تغییرات سالانه دمای حداقل، دمای حداکثر و تبخیر-تعرق حوضه آبریز کارون در افق شصت‌ساله آبی (۲۰۲۱-۲۰۸۰) و تحت سناریوهای انتشار RCPs، آزمون تعیین روند من-کندال به اجرا درآمد (جدول ۵). همچنین، شیب روند تغییرات سالانه پارامترهای اقلیمی مذکور در دوره زمانی آینده و براساس سناریوهای مورد بررسی توسط آماره شیب سین در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۸۰ میلادی و تحت سناریو RCP2.6، روند تغییرات سالانه دمای حداقل، دمای حداکثر و تبخیر-تعرق به ترتیب با ضریب من-کندال ۰/۴۴، ۰/۵۴ و ۰/۲۷ افزایشی است؛ اما این روند افزایشی، معنی‌دار نمی‌باشد. براساس آماره شیب سین، در افق شصت‌ساله آبی (۲۰۲۱-۲۰۸۰) و تحت سناریوی خوش‌بینانه، میزان افزایش دمای حداقل و حداکثر برابر با ۰/۱۲ درجه سانتی‌گراد و مقدار افزایش تبخیر-تعرق در حدود ۵/۸ میلی‌متر پیش‌بینی می‌شود.

براساس الگوی انتشار حد وسط (RCP4.5)، روند سالانه دمای حداقل، دمای حداکثر و تبخیر-تعرق با آماره من-کندال ۵/۳۵، ۵/۵۲ و ۵/۲۵ صعودی است که در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار هستند. با توجه به ضریب شیب سین، مقدار افزایش دمای حداقل و حداکثر در این سناریو و برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۸۰ به ترتیب برابر با ۱/۶ و ۲ درجه سانتی‌گراد و برای متغیر تبخیر-تعرق، ۱۱۰/۲ میلی‌متر پیش‌بینی می‌شود.

در این رابطه،  $E_w$  تبخیر از سطح آب در مخزن سد برحسب میلی‌متر در روز،  $E_{pan}$  تبخیر ناشی از تشت برحسب میلی‌متر در روز و  $k$  ضریب ثابتی است که برای تشت کلاس A، مقدار آن بین ۰/۶ تا ۰/۷۷ و به‌طور متوسط ۰/۷ در ماه‌های مختلف سال متغیر است (علیزاده، ۱۳۸۷). ضریب تشت تبخیر برای ماه‌های مختلف سال را می‌توان از جدول (۳) تخمین زد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقدار ضریب تشت در ماه‌های سرد سال، کم و در ماه‌های گرم سال به دلیل جذب حرارت خورشید توسط توده آب دریاچه‌ها و در نتیجه بالا رفتن مقدار تبخیر از سطح آزاد آب، بیشتر می‌شود که این تفاوت زیاد چشمگیر نیست.

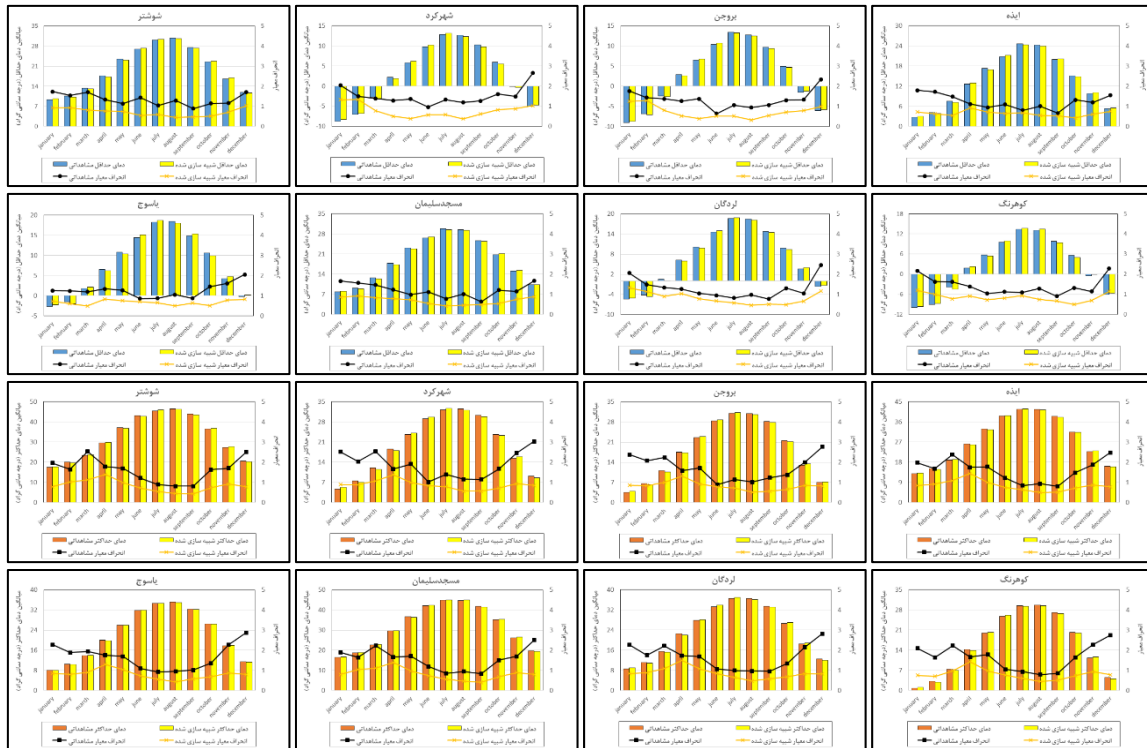
جدول ۳- ضریب تشت کلاس A برای برآورد تبخیر از سطح آزاد آب

در مخزن سد شهید عباسپور			
ماه	ضریب	ماه	ضریب
ژانویه	۰/۶۰	جولای	۰/۷۷
فوریه	۰/۷۰	اگوست	۰/۷۷
مارس	۰/۷۲	سپتامبر	۰/۷۷
آوریل	۰/۷۳	اکتبر	۰/۷۰
می	۰/۷۴	نوامبر	۰/۶۳
ژوئن	۰/۷۶	دسامبر	۰/۶۰

## نتایج و بحث

### نتایج ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG6 در شبیه‌سازی تغییرات پارامترهای اقلیمی

به‌طور کلی توانایی مدل مولد داده‌های آب و هوایی اثر مستقیمی بر روی ارزیابی تغییر اقلیم در منطقه مورد مطالعه دارد؛ لذا به‌منظور کالیبره کردن و اطمینان از صحت مدل LARS-WG6، ابتدا مدل برای دوره آماری مشاهداتی (۲۰۱۵-۱۹۹۶) اجرا گردید؛ سپس خروجی‌های مدل که شامل میانگین ماهانه دمای حداقل و حداکثر و



شکل ۲- مقایسه میانگین و انحراف معیار دمای حداقل و دمای حداکثر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه

جدول ۴- نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG6 با استفاده از معیارهای نکویی برازش

ایستگاه‌های هواشناسی	نوع پارامتر	شاخص		
		R <sup>2</sup>	RMSE	MSE
یاسوج	دمای حداقل	۰/۹۹	۰/۰۶۶	۰/۰۰۴
	دمای حداکثر	۰/۹۹	۰/۲۰۷	۰/۰۴۳
لردگان	دمای حداقل	۰/۹۸	۰/۱۷۵	۰/۰۳۱
	دمای حداکثر	۰/۹۹	۰/۰۷۹	۰/۰۰۶
شهرکرد	دمای حداقل	۰/۹۸	۰/۱۵۲	۰/۰۲۳
	دمای حداکثر	۰/۹۹	۰/۱۵۸	۰/۰۲۵
بروجن	دمای حداقل	۰/۹۸	۰/۱۳۵	۰/۰۱۸
	دمای حداکثر	۰/۹۹	۰/۱۹۷	۰/۰۳۹
کوهرنگ	دمای حداقل	۰/۹۸	۰/۱۳۲	۰/۰۱۷
	دمای حداکثر	۰/۹۹	۰/۲۳۵	۰/۰۵۵
مسجدسلیمان	دمای حداقل	۰/۹۹	۰/۰۸۴	۰/۰۰۷
	دمای حداکثر	۰/۹۹	۰/۱۳۶	۰/۰۱۹
ایذه	دمای حداقل	۰/۹۹	۰/۰۹۳	۰/۰۰۹
	دمای حداکثر	۰/۹۹	۰/۱۸۸	۰/۰۳۵
شوشتر	دمای حداقل	۰/۹۹	۰/۱۰۷	۰/۰۱۱
	دمای حداکثر	۰/۹۹	۰/۱۴۵	۰/۰۲۱

۶/۵۸ است که در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار هستند. براساس شیب سین، مقدار افزایش دمای حداقل و حداکثر در این سناریو و برای دوره شصت ساله آینده به ترتیب ۳ و ۳/۲ درجه سانتی‌گراد و برای متغیر تبخیر-تعرق، ۱۵۷/۷ میلی‌متر پیش‌بینی می‌شود.

براساس سناریوی بدبینانه (RCP8.5)، روند افزایشی معنی‌دار برای متغیرهای دمای حداقل، حداکثر و تبخیر-تعرق مشاهده می‌شود. تحت این سناریو، مقدار ضریب من‌کنندال برای متغیرهای دمای حداقل، دمای حداکثر و تبخیر-تعرق به ترتیب برابر با ۷/۱۹، ۷/۳۳ و ۷/۱۹ و



جدول ۵- نتایج تحلیل روند تغییرات سالانه پارامترهای اقلیمی حوضه آبریز کارون در دوره ۲۰۸۰-۲۰۲۱ و تحت سناریوهای RCPs

سناریوهای انتشار			آماره	پارامتر
RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6		
۷/۳۳**	۵/۳۵**	۰/۴۴	من کندال	دمای حداقل
۰/۰۵۰	۰/۰۲۷	۰/۰۰۲	شیب سن	(°C)
۷/۱۹**	۵/۵۲**	۰/۵۴	من کندال	دمای حداکثر
۰/۰۵۳	۰/۰۳۳	۰/۰۰۲	شیب سن	(°C)
۶/۵۸**	۵/۲۵**	۰/۲۷	من کندال	تبخیر-تعرق
۲/۶۲۹	۱/۸۳۷	۰/۰۹۶	شیب سن	(mm)

\*\* در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار است.

می‌دهد که تمامی متغیرها با یکدیگر همبستگی دارند و رابطه‌ای مستقیم بین متغیرهای مستقل (دمای حداقل، دمای حداکثر و تبخیر-تعرق) با یکدیگر و با متغیر وابسته (تبخیر از تشت) برقرار است. بیشترین مقدار ضریب همبستگی بین دمای حداقل و حداکثر ترتیب متوسط دمای حداکثر، دمای حداقل و تبخیر-تعرق بیشترین همبستگی را با میزان تبخیر از تشت در ایستگاه آب‌سنجی شهید عباسپور دارند که در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار هستند.

### نتایج بررسی صحت دقت مدل رگرسیونی تبخیر از تشت (MLR-E<sub>pan</sub>)

در مدل‌های رگرسیونی، برای مشخص شدن سهم هر یک از متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته به ضرایب رگرسیون فاقد واحد نیاز است؛ چراکه واحد اندازه‌گیری متغیرهای اقلیمی متفاوت است؛ بنابراین می‌بایست از ضرایب رگرسیون استاندارد بهره گرفت. در این بخش از تحقیق، از نمره استاندارد Z، جهت استانداردسازی رگرسیون استفاده گردید. در جدول (۶)، ماتریس همبستگی بین متغیرهای اقلیمی مورد استفاده به صورت جفتی محاسبه شده است. این ماتریس نشان

جدول ۶- ماتریس مقارن همبستگی بین متغیرهای اقلیمی و متوسط تبخیر از تشت در دوره پایه

parameter		T-min	T-max	Etp	E <sub>pan</sub>
T-min	Pearson Correlation	1	.989**	.939**	.925**
	Sig. (2-tailed)		.000	.000	.000
T-max	Pearson Correlation	.989**	1	.943**	.928**
	Sig. (2-tailed)	.000		.000	.000
Etp	Pearson Correlation	.939**	.943**	1	.904**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000		.000
E <sub>pan</sub>	Pearson Correlation	.925**	.928**	.904**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

۱/۵۶۰ است که در حداقل بین ۱/۵ تا ۲/۵ قرار می‌گیرد؛ بنابراین ناهمبسته بودن خطاها نیز تأیید می‌شود. در جدول (۷: ب)، تحلیل واریانس برای مدل رگرسیونی نشان داده شده است. در این جدول، میزان F مدل رگرسیون، ۵۲۷/۶۵ و احتمال معنی‌داری آن برابر ۰/۰۰۰ است و سهم مدل در تغییرات کل به نسبت سهم خطا یا باقی‌مانده‌ها بسیار بیشتر است؛ در نتیجه مدل رگرسیون با سه متغیر مذکور معنی‌دار است. در جدول (۷: ج)، برآورد ضرایب و خصوصیات مربوط به آزمون آن‌ها دیده می‌شود. ضرایب استاندارد محاسبه شده نشان می‌دهد که T-max، T-min و Etp به ترتیب با مقدار ۰/۴۱۴، ۰/۲۸۳ و ۰/۲۴۸، بیشترین تأثیرگذاری را در مقدار E<sub>pan</sub> دارند و دمای

در جدول (۷)، نتایج آماره‌های مدل رگرسیونی تبخیر از تشت ایستگاه هیدرومتری شهید عباسپور در دوره مشاهداتی به‌منظور بررسی صحت دقت مدل آورده شده است. با وارد کردن سه متغیر دمای حداقل، دمای حداکثر و تبخیر و تعرق به مدل رگرسیونی مشخص گردید که به ترتیب ضریب همبستگی، ضریب تبیین و ضریب تبیین اصلاح شده مدل با مقدار تبخیر از تشت ماهانه برابر با ۰/۹۳۳، ۰/۸۷۲ و ۰/۸۷۰ است (جدول ۷: الف). این بدان معناست که ۸۷ درصد تغییرات تبخیر از تشت توسط این سه متغیر می‌تواند تبیین شود. ناهمبسته بودن خطاها توسط شاخص دوربین-واتسون مورد آزمون قرار گرفت. مقدار این شاخص برای مدل تبخیر از تشت،

و انحراف معیار یا واریانس ۱ هست؛ بنابراین با توجه به نتایج آزمون فرضیات می‌توان مدل رگرسیونی سه متغیره تبخیر از تشت با عناصر اقلیمی را به صورت رابطه ذیل ارائه نمود:

$$\text{AnnualE}_{\text{pan}} = -46.7 + (6.21 \times T_{\text{min}}) + (6.96 \times T_{\text{max}}) + (0.39 \times \text{Etp}) \quad (۸)$$

حداکثر بهترین متغیر برای پیش‌بینی تبخیر از تشت در ایستگاه هیدرومتری شهید عباسپور است. با توجه به اینکه مقدار sig در آزمون t کمتر از ۰/۰۵ است؛ لذا هر سه متغیر در مدل، اثر معنی‌داری دارند. براساس (جدول ۷: د)، باقی‌مانده‌ها دارای توزیع نرمال با میانگین صفر

جدول ۷- خلاصه آماره‌های مدل رگرسیونی تبخیر از تشت در ایستگاه هیدرومتری شهید عباسپور

Residuals Statistics<sup>a</sup> (الف) Coefficients<sup>a</sup> (ب) ANOVA<sup>b</sup> (ج) Model Summary<sup>b</sup> (د)

الف	R	R Square	Adjusted R Square		Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
Model	.933a	.872	.870		61.57810	1.560
ب	Sum of Squares		df	Mean Square	F	Sig.
Regression	6002407.290		3	2000802.430	527.657	.000 <sup>a</sup>
Residual	894879.488		236	3791.862	-	-
Total	6897286.779		239	-	-	-
ج	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		t	Sig.
	B	Std. Error	Beta			
(Constant)	-46.701	32.600	-		-5.805	.000
T-min	6.213	3.576	.283		1.737	.041
T-max	6.958	2.841	.414		2.449	.015
Etp	.391	.112	.248		3.483	.001
د	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N	
Predicted Value	-20.9632	494.5211	2.5329E2	158.47610	240	
Residual	-1.49788E2	1.35202E2	.00000	61.19040	240	
Std. Predicted Value	-1.731	1.522	.000	1.000	240	
Std. Residual	-2.432	2.196	.000	.994	240	

افزایش ماهانه تبخیر سطحی از مخزن سد در ماه می و به مقدار ۳۷/۵ میلی‌متر و در دوره‌های آینده میانه و دور (تحت سناریو RCP8.5) در ماه ژوئن و به ترتیب برابر با ۴۷/۳ و ۶۱/۴ میلی‌متر رخ خواهد داد. در دوره‌های زمانی آینده، دامنه تغییرات تبخیر سطحی از مخزن سد از ۲/۱- میلی‌متر (ماه نوامبر و تحت سناریوی ۲/۶) تا ۶۱/۴ میلی‌متر (ماه ژوئن و تحت سناریوی ۸/۵) در هر سه سناریو متغیر است.

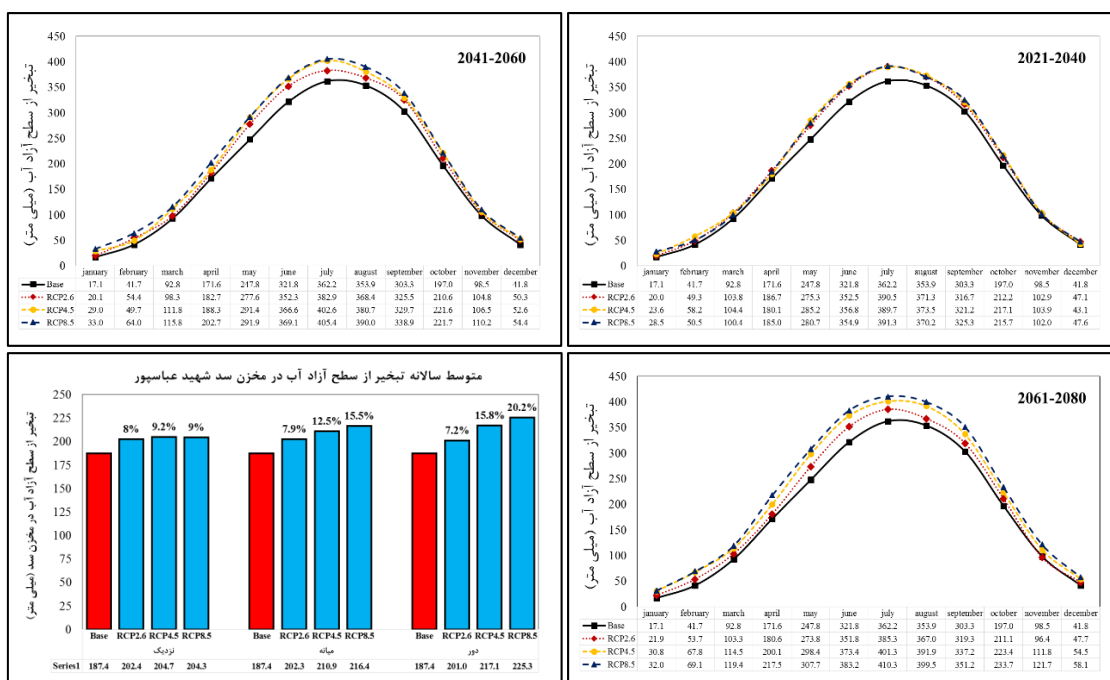
با توجه به افزایش دمای حداقل، حداکثر و تبخیر-تغرق به‌عنوان متغیرهای مؤثر در تبخیر سطحی از مخزن در دوره‌های زمانی آینده و براساس هر سه الگوی واداشت تابشی، متوسط سالانه تبخیر از سطح آزاد آب مخزن در مقایسه با دوره مشاهداتی نیز افزایش خواهد یافت؛ به طوری که تحت سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در دوره آینده نزدیک، مقدار افزایش تبخیر سطحی از مخزن سد به ترتیب برابر با ۸، ۹/۲ و ۹ درصد، در دوره آینده میانه به ترتیب به میزان ۷/۹، ۱۲/۵ و ۱۵/۵ درصد و در دوره آینده دور به مقدار ۷/۲، ۱۵/۸ و ۲۰/۲ درصد خواهد بود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود

پیش‌بینی تبخیر از سطح آزاد آب در مخزن سد شهید عباسپور در دوره‌های آتی و تحت سناریوهای انتشار RCPs

در این بخش از مطالعه، ابتدا میزان تبخیر از تشت در دوره‌های آتی و تحت سناریوهای انتشار RCPs با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شد؛ سپس با استفاده از معادله تشت تبخیر و با اعمال ضرایب تشت کلاس A در هر ماه، مقدار تبخیر از سطح آزاد آب در مخزن سد شهید عباسپور، تحت سناریوهای موردبررسی در دوره‌های زمانی آینده پیش‌بینی گردید. در شکل (۳)، متوسط بلندمدت ماهانه و سالانه تبخیر از سطح آزاد آب در مخزن سد شهید عباسپور در دوره پایه و دوره‌های آتی و تحت الگوهای انتشار RCPs نشان داده شده است. مطابق نتایج به دست آمده، به جز ماه نوامبر در دوره آینده دور و تحت سناریوی خوش‌بینانه (RCP2.6) که مقدار تبخیر از سطح آزاد آب در مخزن سد شهید عباسپور به میزان ۲/۱ میلی‌متر کاهش می‌یابد در دیگر الگوهای واداشت تابشی، مقدار تبخیر سطحی در تمامی ماه‌های سال نسبت به دوره پایه، افزایش خواهد یافت؛ به طوری که در دوره آینده نزدیک و تحت سناریوی انتشار RCP4.5، بیشترین میزان

کمترین مقدار افزایش تبخیر آب از سطح مخزن سد شهید عباسپور در دوره آینده دور و تحت سناریوی خوش‌بینانه (RCP2.6) برابر با ۱۳/۶ میلی‌متر و بیشترین مقدار افزایش آن در همین دوره و تحت سناریوی بدبینانه (RCP8.5) به میزان ۳۷/۹ میلی‌متر رخ خواهد داد.

مقدار افزایش تبخیر آب از سطح مخزن سد شهید عباسپور در دوره آینده دور و تحت سناریوی خوش‌بینانه (RCP2.6) برابر با ۱۳/۶ میلی‌متر و بیشترین مقدار افزایش آن در همین دوره و تحت سناریوی بدبینانه (RCP8.5) به میزان ۳۷/۹ میلی‌متر رخ خواهد داد.



شکل ۳- متوسط بلندمدت ماهانه و سالانه تبخیر از سطح آزاد آب در دوره پایه و دوره‌های آبی و تحت سناریوهای انتشار RCPs

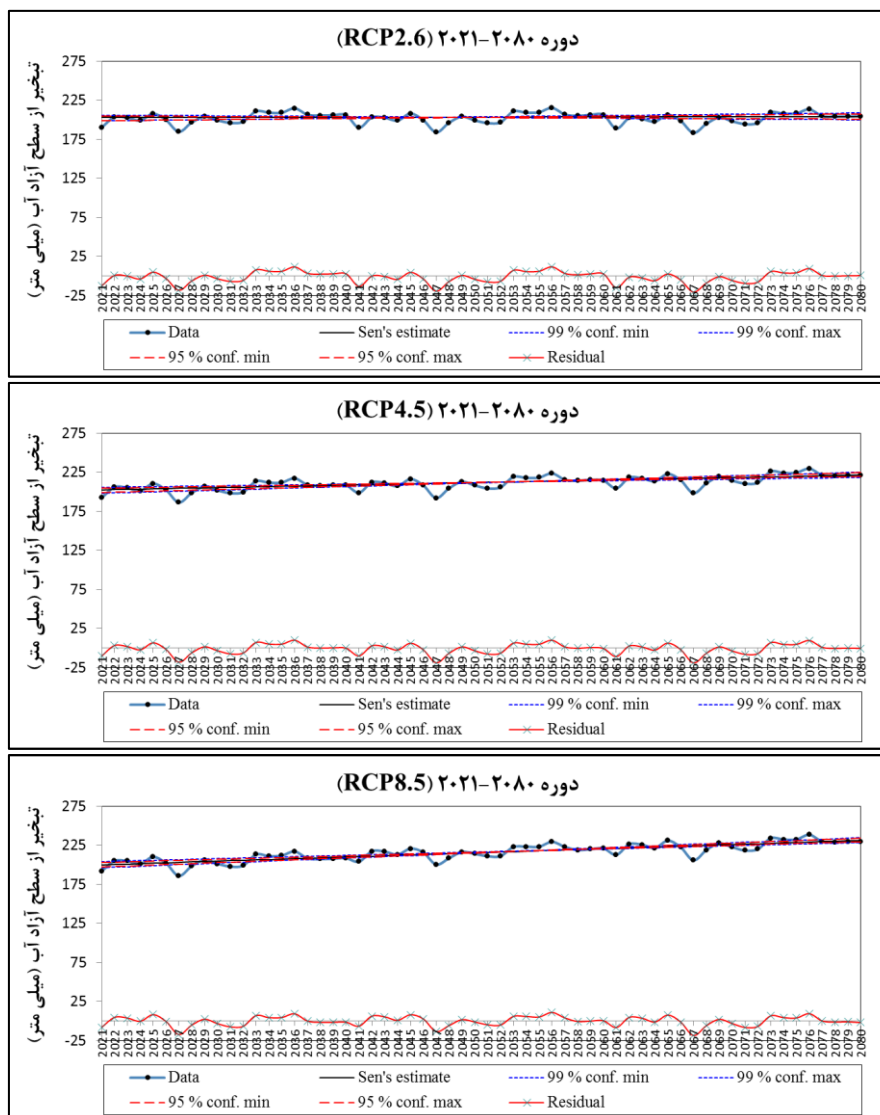
بررسی روند تغییرات سالانه تبخیر از سطح آزاد آب در مخزن سد شهید عباسپور دوره آبی و تحت سناریوهای انتشار RCPs به منظور بررسی روند تغییرات سالانه تبخیر از سطح آزاد آب در مخزن سد شهید عباسپور در دوره آبی، آزمون تعیین روند من-کندال و شیب سبن برای سری زمانی شصت‌ساله آبی (۲۰۲۱-۲۰۸۰) به عمل آمد که نتایج حاصل از آن در جدول (۸) و شکل (۴) آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۸۰ میلادی، روند تغییرات سالانه تبخیر از سطح آزاد آب در مخزن سد، تحت سناریوی خوش‌بینانه (RCP2.6) با ضریب من-کندال ۰/۵۰ و شیب سبن ۰/۰۲۳ افزایشی است اما این روند افزایشی، معنی‌دار نمی‌باشد. تحت این سناریو، میزان افزایش تبخیر از سطح مخزن در دوره

شصت‌ساله آبی برابر با ۱/۴ میلی‌متر پیش‌بینی می‌شود. روند حجم تبخیر از سطح مخزن سد به ترتیب در سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 افزایشی است که با ضریب من-کندال ۵/۵۳ و ۷/۱۹ در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار است. براساس آماره شیب سبن، در دوره ۲۰۸۰-۲۰۲۱ و تحت سناریوی حد وسط (RCP4.5)، مقدار افزایش تبخیر از سطح آزاد آب تقریباً ۱۹/۱ میلی‌متر و در سناریوی بدبینانه (RCP8.5) در حدود ۳۱/۹ میلی‌متر خواهد بود؛ بنابراین با توجه به آماره شیب سبن می‌توان نتیجه گرفت که در دوره زمانی آینده و تحت سناریوی بدبینانه، شیب روند صعودی سری متوسط حجم تبخیر از مخزن سد شهید عباسپور، تندتر از سناریوهای خوش‌بینانه و حد وسط رخ خواهد داد.

جدول ۸- نتایج تحلیل روند تغییرات سالانه تبخیر از سطح آزاد آب در دوره ۲۰۸۰-۲۰۲۱ و تحت سناریوهای انتشار RCPs

سناریوهای انتشار RCPs			آماره	دوره آبی
RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6		
۷/۱۹ **	۵/۵۳ **	۰/۵۰	من کندال	(۲۰۲۱-۲۰۸۰)
۰/۵۳۱	۰/۳۱۹	۰/۰۲۳	شیب سبن	
روند افزایشی معنی‌دار			معنی‌داری روند	

روندهای معنی‌دار در سطح ۰/۰۱ با \*\* مشخص شده است.



شکل ۴- نمودار شیب روند تغییرات سالانه تبخیر از سطح آزاد آب در دوره ۲۰۲۱-۲۰۸۰ و تحت سناریوهای انتشار RCPs براساس آماره شیب سین

## نتیجه گیری

ذخیره آب جهت تأمین نیاز آب در بخش کشاورزی، صنعت، شرب و انرژی برق آبی دارد؛ به همین منظور در این پژوهش، روند تغییرات تبخیر از سطح آزاد آب در مخزن سد شهید عباسپور با استفاده از مدل رگرسیونی تست تبخیر (MLR-Epan) در دوره‌های آتی و تحت الگوهای مختلف واداشت تابشی موردبررسی قرار گرفت که نتایج کلی آن به شرح ذیل می‌باشد:

الف) صحت دقت مدل رگرسیونی تست تبخیر در دوره پایه توسط نتایج آزمون فرضیات مورد تأیید قرار گرفت؛ به طوری که ۸۷٪ تغییرات تبخیر از تست توسط سه متغیر دمای حداقل، دمای حداکثر و تبخیر-تعرق تبیین می‌شود.

ب) تحت سناریوی انتشار RCP2.6، روند تغییرات سالانه

منابع آب کشور از جمله بخش‌هایی است که به‌طورجدی از تغییر اقلیم در آینده متأثر خواهد شد و حوضه‌های وسیعی از آن، شامل آب‌های سطحی و زیرزمینی، سازه‌های آبی، شبکه‌های آب و فاضلاب، شبکه‌های آب‌رسانی شهری و سازه‌های مرتبط با بخش آب با پیامدهای فراوانی روبه‌رو خواهند شد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش یک درجه سانتی‌گراد دمای کشور، معادل ۱۳ میلیارد مترمکعب منابع آبی کشور از طریق تبخیر از دسترس خارج می‌شود و این تهدید بزرگی برای منابع روباز آبی کشور است (زیست آنالاین، <https://www.zistonline.com>). حوضه آبریز کارون با داشتن سدهای مخزنی بزرگ مانند سد شهید عباسپور نقش بسیار مهمی در

ریزمقیاس سازی پارامترهای زیست‌محیطی در مطالعات تغییر اقلیم. ششمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط‌زیست، تهران.

ابراهیمی، ح.، بزی، حسین. و امین نژاد، ب. ۱۴۰۰. اثر تغییر اقلیم بر تغییرات تبخیر از سطح چاه نیمه‌های سیستان. نشریه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست. ۲۳ (۱۲): ۱۳۵-۱۲۱.

ابراهیمی، ح. و یزدانی، و. ۱۳۹۲. محاسبه تبخیر-تعرق فضای سبز به روش سبال (مطالعه موردی: پارک ملت مشهد). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک. ۲۰ (۳): ۱۵۱-۱۳۳.

بابائیان، ا.، کریمیان، م.، مدیریان، ر.، فلامرزی، ی. و کوهی، م. ۱۴۰۰. پیش‌نگری بارش و دمای شرق کشور با استفاده از مقیاس کاهی ترکیبی دینامیکی-آماری. فصل‌نامه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی. ۵ (۵): ۵۸-۴۱.

باب الحکمی، ع.، غلامی، م. ع. و عمادی، ع. ر. ۱۳۹۹. اثر تغییر اقلیم بر تبخیر-تعرق مرجع در استان مازندران. مجله تحقیقات آب‌و خاک ایران. ۵۱ (۲): ۴۰۱-۳۸۸.

جهانبخش اصل، س.، خورشیددوست، ع. م. و عالی نژاد، م. ح. ۱۴۰۰. بررسی تغییرات دما و بارش حوضه سیمره با استفاده از مدل‌های اقلیمی سری CMIP5. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. ۸ (۳): ۳۲-۱۷.

رحیمی، د. و زارعی، ف. ۱۳۹۸. اثرات تغییر اقلیم بر حجم منابع آب و انتقال آب بین حوضه‌ای. نشریه علوم مهندسی و آبیاری. ۴۲ (۳): ۶۱-۷۴.

سایت زیست آنالاین. ۱۴۰۱. <https://www.zistonline.com>.

سیدکابلی، ح. ۱۳۹۵. تصویرسازی دمای هوا و تبخیر از مخازن آب در شرایط تغییر اقلیم آتی (مطالعه موردی: سد دز). نشریه پژوهش آب ایران. ۱۰ (۲۳): ۱۱۰-۱۰۱.

شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران، دفتر بهره‌برداری و نگهداری از سدها. ۱۳۹۲. <http://dams.wrm.ir>.

صفوی، ح. ر. ۱۳۹۳. هیدرولوژی مهندسی. انتشارات ارکان دانش. چاپ چهارم. اصفهان.

عابدی کوپایی، ج. و مظاهری، ا. ۱۳۹۵. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر دما و تبخیر از مخازن آزاد در اصفهان. دومین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

عساکره، ح. ۱۳۹۰. مبانی اقلیم‌شناسی آماری، انتشارات دانشگاه

پارامترهای اقلیمی (دمای حداقل، دمای حداکثر و تبخیر-تعرق) و به تبع آن، حجم تبخیر از سطح آزاد آب در مخزن سد شهید عباسپور، افزایش است؛ اما این روند افزایشی، معنی‌دار نیست؛ درحالی‌که تحت الگوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5، روند سالانه پارامترهای مذکور در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ افزایش می‌یابد.

ج) براساس نتایج آماره شیب سین در دوره شصت‌ساله آینده (۲۰۸۰-۲۰۲۱) و تحت سناریوی خوش‌بینانه (RCP2.6)، افزایش ۰/۱۲ درجه سانتی‌گرادی دمای حداقل و حداکثر و افزایش ۵/۸ میلی‌متری تبخیر-تعرق، موجب افزایش ۱/۴ میلی‌متری حجم تبخیر سطحی از مخزن سد شهید عباسپور خواهد شد.

د) براساس نتایج شیب سین در دوره شصت‌ساله آینده و تحت الگوی انتشار حد وسط (RCP4.5)، افزایش ۱/۶ درجه سانتی‌گرادی دمای حداقل، ۲ درجه سانتی‌گرادی دمای حداکثر و ۱۱۰/۲ میلی‌متری تبخیر-تعرق، موجب افزایش ۱۹/۱ میلی‌متری تبخیر از سطح آزاد آب در مخزن سد خواهد شد.

و) براساس نتایج آزمون شیب سین در دوره شصت‌ساله آینده و تحت سناریوی انتشار بدبینانه (RCP8.5)، افزایش ۳ و ۳/۲ درجه سانتی‌گرادی دمای حداقل و حداکثر و نیز افزایش ۱۵۷/۷ میلی‌متری تبخیر-تعرق، مقدار تبخیر از سطح آزاد آب در مخزن سد شهید عباسپور را به میزان ۳۱/۹ میلی‌متر افزایش خواهد داد.

باوجود آنکه در زمینه اثرات تغییر اقلیم بر میزان تبخیر از سطح آزاد آب، تحقیقات اندکی در کشور صورت گرفته است؛ اما نتایج این پژوهش با مطالعات گرجی زاده (۱۳۹۳)، سیدکابلی و کمائی (۱۳۹۵)، رحیمی و زارعی (۱۳۹۸) و ابراهیمی و همکاران (۱۴۰۰) مطابقت دارد. این بدان معناست که پدیده گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی انکارناپذیر که برای دوره‌های زمانی آینده پیش‌بینی شده، موجب تغییر (افزایش) حجم تبخیر سطحی در منابع آبی مورد مطالعه گردیده است؛ لذا ضرورت دارد هرگونه تغییر در اقلیم آینده به‌عنوان اولین زنجیره تأثیرگذار در تغییر حجم تبخیر از سطوح آزاد آب در مخازن سدها مورد توجه قرار گیرد تا با برنامه‌ریزی صحیح و اتخاذ تصمیمات درست بتوان از تلفات تبخیر کم نمود. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق و به‌منظور اطمینان بیشتر به خروجی مدل‌های شبیه‌سازی منابع آب تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم، پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات بعدی، سایر روش‌های ریزمقیاس‌گردانی و دیگر مدل‌های GCM تعریف شده در فاز ششم پروژه مقایسه متقابل مدل جفت شده (CMIP6) مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرند.

## منابع

آقاشاهی، م.، اردستانی، م.، نیک سخن، م. ح. و طهماسبی، ب. ۱۳۹۱. معرفی و مقایسه مدل‌های LARS-WG و SDSM به‌منظور

a large reservoir in Australia. *Journal of Hydrology*. 365-378.

Irmak, S., Haman, D. and Jones, J. 2002. Evaluation of class A pan coefficients for estimating reference evapotranspiration in humid location. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 128(3): 153-159.

Johnson, F. and Sharma, A. 2010. A comparison of Australian open water body evaporation trends for current and future climates estimated from class a evaporation pans and general circulation models. *Journal of Hydrometeorology*. 11: 105-121.

Johns, T.C., Durman, C.F., Banks, H.T., Roberts, M.J., McLaren, A.J., Ridley, J.K., Senior, C.A., Williams, K.D., Jones, A., Rickard, G.J. and Cusack, S. 2006. The new Hadley Centre climate model (HadGEM1): Evaluation of coupled simulations. *Journal of Climate*. 19(7): 1327-1353.

Kling, H., Fuchs, M. and Paulin, M. 2012. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *J. Hydrol.* 424: 264-27.

Ma, Lili., Yun Wu, J. J. and Chaoxing, H.e. 2011. The prediction model for soil water evaporation based on BP neural network, Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), International. 2: 276-280.

Minville, M., Brissette, F. and Leconte, R. 2008. Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a Nordic watershed. *Journal of Hydrology*. 358 (1-2):70- 83.

Racsko, P., Szeidl, L. and Semenov, MA. 1991. Serial approach to local stochastic weather models. *Ecol Model.* 57: 27-41.

Salmi, T., Määttä, A., Anttila, P., Ruoho-Airola, T. and Amnell, T. 2002. Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates the Excel template application MAKESENS. Finnish Meteorological Institut. DOI: 10.4236/jmp.2012.38101.

Semenov, M.A. and Barrow, EM. 1997. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change*. 35: 397-414.

Semenov, M.A. and Stratonovich, P. 2010. The use of multi-model ensembles from global climate model for impact assessment of climate change. *Clim. Res.* 41:1-14.

Sen, P.K. 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*. 63: 1379-1389.

علیزاده، ا. ۱۳۸۷. هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد.

گرجی زاده، ع. ۱۳۹۳. تعیین عدم قطعیت میزان تبخیر از مخازن سد های بزرگ در دوره های آتی تحت شرایط تغییر اقلیم. پایان نامه کارشناسی ارشد، هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران.

Balan, B., Mohaghegh, S. and Ameri, S. 1995. State- of- Art- in permeability determination from well log data: Part 1- A comparative study. Model development. SPE. 30978:17-25.

Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Hinton, T., Jones, C. D., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J. and Senior, C. 2008. Evaluation of the HadGEM2 model. Hadley Cent. Tech. Note, 74.

Craig, L., Green, A., Scobie, M. and Schmidt, E. 2005. Controlling Evaporation Loss from Water Storages. Echnical Report. University of Southern Queensland, National Centre for Engineering in Agriculture, Toowoomba, Australia.

Dankers, R. and Christensen, O. B. 2005. Climate change impact on snow coverage, evaporation and river discharge in the sub-arctic tana basin, northern Fennoscandia. 69: 367- 392.

Dimri, A.P., Kumar, D., Choudhary, A. and Maharana, P. 2018. Future changes over the Himalayas, Maximum and minimum temperature. *Global and Planetary Change*. 162: 212-234.

Gao, Y., Long, D. and Li, Z. 2008. Estimation of daily evapotranspiration from remotely sensed data under complex terrain over the upper Chao river basin in north China. *International Journal of Remote Sensing*. 29 (11): 3295-3315.

Gianniou, S.K. and Antonopoulos, V.Z. 2007. Evaporation and energy budget in Lake Vegoritis, Greece. *Journal of Hydrology*. (345): 212-223.

Gocic, M. and Trajkovic, S. 2013. Analysis Mann-Kendall and of changes in meteorological variables usin Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*. 100: 172-182.

Hargreaves, G.H. and Samani, Z. 1985. Reference crop evapotranspiration from ambient air tempraturer. Meeting American Society of Agricultural Engineers, Chicago. *Applied Engineering in Agriculture*. 1(2): 96-99.

Helfer, F., Lemckert, C. and Zhang, H. 2012. Impacts of climate change on temperature and evaporation from

Zhang, X., Vincent, L.A., Hogg, W.D. and Niitsoo, A. 2000. Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century. *Atmosphere – Ocean*. 38(3): 395-429.

Sima, S., Ahmadalipour, A. and Tajrishy, M. 2013. Mapping surface temperature in a hyper-saline lake and investigating the effect of temperature distribution on the lake evaporation. *Remote Sensing of Environment*. 136, 374-385.

## Investigating Changes in the Process of Evaporation from the Free Water Surface in the Context of Future Climate Change Using the MLR-E\_Pan Model (Case Study: Shahid Abbaspur Dam Reservoir)

H. Behzadi Karimi<sup>1</sup>, G. Mozafari<sup>2\*</sup>, K. Omidvar<sup>3</sup>, A. Mazidi<sup>4</sup>

Received: Aug.09, 2021

Accepted: Sep.09, 2022

### Abstract

Climate change can alter the amount of evaporation from water surfaces. Therefore, the estimation of evaporation from dam reservoirs is essential in water resources management. In this study, the future perspective of evaporation from the free water surface of Shahid Abbaspur dam reservoir was investigated using the multiple linear regression analysis of pan evaporation (MLR-E<sub>pan</sub>), the micro-scale atmospheric circulation model of LARS-WG6, and HadGEM2-ES model output, under RCPs emission scenarios for three time periods of 2021-2040, 2041-2060, and 2061-2080. The results of the Mann-Kendall test from 2021 to 2080 showed that under the RCP2.6 scenario, the trend of annual changes in the minimum temperature, maximum temperature, and evapotranspiration of the Karun catchment basin was insignificant. However, under RCP4.5 and RCP8.5 emission patterns, the annual trend of the mentioned parameters increased significantly ( $\alpha = 0.01$ ). Based on Sen's slope statistic, the increase in the minimum and maximum temperature in the pessimistic scenario (RCP8.5) for the next 60-year period is predicted to be 3 and 3.2 °C, respectively. This increase is estimated to be 157.7 mm for evapotranspiration. The accuracy of MLR-E<sub>pan</sub> in the base period was confirmed by the results of the hypotheses tests, so that 87% of the changes in evaporation from the pan was explained by the three variables of minimum temperature, maximum temperature, and evapotranspiration. The findings showed that in the coming periods and based on all three radiative forcing patterns, the average annual surface evaporation from the Shahid Abbaspur dam reservoir will increase from 7.2 to 20.2 percent compared to the observation period. In the next sixty-year period (2021-2080) under the RCP2.6 scenario, the annual evaporation from the free water surface will be on the raise, but the increasing trend is not significant. Nevertheless, under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, the increasing trend is estimated to be significance ( $\alpha = 0.01$ ). Based on Sen's Slope estimator, the amount of evaporation from the reservoir surface is predicted to be 1.4, 19.1, and 31.9 mm, respectively, in the next 60-year period and under the investigated scenarios. Consequently, according to the future climatic conditions, it is necessary to reduce evaporation losses in dam reservoirs with proper planning and informed decisions.

**Keywords:** Climate change, Evaporation from the free water surface, MLR-E\_pan Model, RCPs Scenarios, Shahid Abbaspur Dam Reservoir.

1- Ph.D. Student of Climatology, Yazd University, Yazd, Iran

2- Professor of Climatology, Yazd University, Yazd, Iran

3- Professor of Climatology, Yazd University, Yazd, Iran

4- Associate Professor of Climatology, Yazd University, Yazd, Iran

(\*- Corresponding Author Email: gmozafari@yazd.ac.ir)